

# **AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E DA PLASTICIDADE DE SOLOS ARGILOSOS ADITIVADOS COM CIMENTO PORTLAND**

## **ASSESSMENT OF THE UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH AND PLASTICITY OF CLAY SOILS STABILIZED WITH PORTLAND CEMENT**

Almeida, Guilherme; Universidade Federal de Sergipe, Laranjeiras - SE, Brasil, gbravo1982@gmail.com  
Casagrande, Michéle; Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, Brasil, michele\_casagrande@puc-rio.br  
Cavalcante, Erinaldo; Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PR, Brasil, erinaldo.cavalcante@ufcg.edu.br

### **RESUMO**

Este trabalho apresenta resultados da pesquisa realizada com dois solos típicos do Estado de Sergipe (Nordeste do Brasil) estabilizados com cimento Portland CP V-ARI, com o objetivo de avaliar as possíveis melhorias que o aditivo promove no solo, bem como analisar as alterações na plasticidade. Os ensaios envolveram caracterização (análise granulométrica, limites de Atterberg e massa específica dos grãos), compactação (Proctor Intermediário) e resistência à compressão simples. Para o solo A-2-4 (0) o teor de cimento ideal ficou entre 7 e 9%, e com 3% do aditivo, houve redução na plasticidade. Para o solo A-7-6 (14) não foi possível determinar um teor ideal de cimento, pois houve uma variabilidade de valores de resistência para os teores analisados. No entanto, para este solo, houve uma redução significativa na plasticidade caindo de 25% para 8%, quando se usou o teor de 9% do estabilizante. Para os dois solos, o teor de umidade ótima reduziu-se à medida que aumentou-se o teor de cimento Portland na mistura.

### **ABSTRACT**

This paper presents research results of two typical soils of the State of Sergipe (Northeast of Brazil) stabilized with Portland cement CP V-ARI in order to assess the possible improvements that the additive promotes in the soil, and analyze changes in plasticity. The samples were submitted to the characterization tests (particles sizes, Atterberg limits and specific gravity), compaction (Proctor Intermediate) and unconfined compressive strength. For soil A-2-4 (0) the ideal cement content was between 7 and 9%, and 3% additive promoted a reduction in plasticity. In the soil A-7-6 (14) it was not possible to determine an ideal content of cement, because there was a variation in the resistance values for the analyzed content. However, for this soil, there was a significant reduction in plasticity of 25% to 8% in content of 9% of the stabilizer. For both soils, the optimum moisture content decreased with the increase of Portland cement content in the admixture.

### **1 - INTRODUÇÃO**

O solo é um dos elementos mais importantes na construção civil, pois é parte integrante de processos construtivos: fundações, escavações, pavimentação, material de construção. É um material complexo e variável de acordo com uma série de fatores que o faz originar: intemperismo, rocha mãe, localização, etc. Porém, quando o solo natural não possui os requisitos necessários para cumprir adequadamente a função a que é destinado, uma das soluções possíveis é a alteração das suas características de maneira a melhorar o seu comportamento, tornando-o capaz de satisfazer as solicitações previstas. E essa alteração é denominada de estabilização de solos (Cruz e Jalali, 2010).

Vargas (1977) designa estabilização de solos o processo que confere ao solo uma maior resistência estável às cargas ou desgaste ou à erosão, através da compactação, correção granulométrica e de sua plasticidade ou da adição de substâncias que lhe confirmam uma coesão proveniente da cimentação ou aglutinação dos seus grãos.

Dentre os métodos de estabilização (mecânica, física e química), é na estabilização química que ocorre um número de reações entre o solo, o aditivo estabilizante e a água, para obter um novo material com características melhores do que o solo puro. É natural que as características da estabilização estejam muito relacionadas com o comportamento e qualidade do solo, por ser o componente de maior quantidade e o mais heterogêneo da mistura. Little (1995) apresenta os possíveis estabilizantes mediante os resultados granulométricos e da plasticidade do solo. Segundo o autor, o cimento Portland tem uma aplicação maior quando comparado ao betume e a cal.

Segundo Pereira (1970, em Cruz, 2004), a utilização de cimento como aditivo é indicado para solos granulares, siltosos e argilas pouco plásticas, não sendo adequado para solos orgânicos. Para Ceratti

(1991), qualquer solo pode ser melhorado com cimento, a exceção daqueles abundantes em húmus e mica. No entanto, afirma o autor, solos arenosos de boa graduação e com plasticidade média a baixa são os mais suscetíveis a serem estabilizados com cimento, por requererem baixos teores do aditivo. Por outro lado, os solos com elevada plasticidade são problemáticos já que requerem além de maiores teores de cimento, energéticos equipamentos misturadores.

Para Concha (1986), na estabilização com cimento se desenvolvem reações químicas do cimento hidratado, no qual são desenvolvidos vínculos químicos entre a superfície dos grãos de cimento hidratado e a parte da partícula de solo em contato com o grão de cimento. Segundo Cruz e Jalali (2010), a ação estabilizante do cimento se processa de acordo com o mecanismo da aglutinação e da modificação. No primeiro, o efeito principal do agente estabilizador é o aumento da resistência, em que o cimento forma núcleos interligados distribuídos pela massa de solo. Nesse caso, o teor de aditivo é mais elevado. Quando esse teor é mais baixo, verifica-se uma modificação com efeito na diminuição da plasticidade, podendo ser ou não acompanhado do aumento de resistência mecânica do solo, uma vez que o cimento promove a floculação das partículas de argila.

Quanto ao tipo de cimento Portland, não existem restrições para ser usado na estabilização de solos. Entretanto, Jung et al. (2012) concluíram que a escolha do agente cimentante irá influenciar a resistência mecânica. Para uma mistura com areia de Osório e cimento Portland composto (CP II-E) a resistência à compressão média foi 16% superior à observada para o cimento pozolânico (CP IV). A resistência da mistura com cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI) foi 36% superior ao do CP II-E e 58% superior ao do CP IV.

A qualidade do novo material após a estabilização depende de muitos fatores, uma vez que podem influenciar a sua resistência. Segundo Marangon (1992), a literatura técnica tem considerado como sendo relevantes alguns fatores: granulometria do solo, grau de compactação, tipo e tempo de cura associado à temperatura, tempo entre a mistura e sua compactação, quantidade de água na hidratação do cimento, a homogeneização da mistura e a quantidade de cimento.

Diante desse contexto, o presente trabalho tem por objetivo avaliar a resistência à compressão simples de dois solos: areno-argiloso e argiloso, utilizando como agente estabilizante o cimento Portland, bem como analisar as alterações na plasticidade que o aditivo promove nos dois solos.

## **2 - MATERIAIS E MÉTODOS**

Os dois tipos de solos utilizados nesse estudo foram coletados no município de São Cristóvão, Estado de Sergipe, Região Nordeste do Brasil, nas coordenadas geográficas Latitude 10° 58' 36" S e Longitude 37° 14' 16,3" W para o solo de característica areno-argilosa e coordenadas Latitude 10° 55' 57" S e Longitude 37° 10' 19,6" W para o solo de característica argilosa. O cimento Portland usado na estabilização foi o CP V-ARI (Cimento Portland de alta resistência inicial) com porcentagens adicionadas em relação à massa do solo seco e os teores do aditivo variaram de acordo com os dois tipos de solo estudados.

### **2.1 - Preparação e caracterização do solo**

As amostras de solo passaram por uma secagem prévia ao ar, destorroamento, quarteamento e preparado segundo a norma DNER-ME 041/94. Para a caracterização e classificação foram realizados dois ensaios (E.1 e E.2) de cada um destes: densidade real (DNER-ME 093/94), análise granulométrica (DNER-ME 051/94), limite de liquidez (DNER-ME 082/94) e limite de plasticidade (DNER-ME 122/94), obtendo-se a média entre eles. Na etapa da sedimentação, as amostras de solo foram deixadas em repouso na solução de hexametáfosfato de sódio (defloculante), conforme descreve a norma de análise granulométrica.

### **2.2 - Compactação do solo e da mistura de solo e cimento Portland**

As relações umidade versus massa específica aparente seca foram determinadas seguindo a norma DNER-ME 129/94, com a energia de compactação intermediária de 26 golpes por camada. Nas misturas solo e cimento foi seguida a norma DNER-ME 216/94 aplicado ao método B, quando usado material que passa na peneira de 19 mm e quando parte da amostra fica retida na peneira de 4,8 mm. Dessas relações foram considerados aceitáveis os valores que não ultrapassaram os limites de  $\pm 5\%$  da média dos resultados dos dois ensaios realizados (E.1 e E.2).

Apesar de a norma DNER-ME 216/94 descrever a energia normal para solo-cimento, foi utilizado a energia intermediária, uma vez que esta pesquisa faz parte de um estudo experimental no qual será misturada ao solo-cimento porcentagens de resíduos de cobre pós-jateado caracterizando, portanto, uma estabilização granulométrica. Segundo a norma DNIT 139/2010 – ES, a energia mínima requerida é a intermediária.

## 2.3 - Moldagem e cura dos corpos de prova

As condições requeridas para a moldagem de corpos de prova cilíndricos foram seguidas pela norma DNER-ME 202/94, conforme o método B, quando usado material que passa na peneira de 19 mm e quando parte da amostra fica retida na peneira de 4,8 mm. Baseado na justificativa descrita no item anterior, a moldagem também foi realizada na energia intermediária. O período de cura dos corpos de prova foi de sete dias em câmara úmida a uma temperatura de  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ .

## 2.4 - Resistência à compressão simples (RCS)

Como parâmetro normativo para o ensaio à compressão simples foi utilizada a norma DNER-ME 201/94. A prensa utilizada foi a Máquina Universal de Ensaio, eletrodinâmica e microprocessada DL 20000 da EMIC Equipamentos e Sistemas de Ensaio. O software para aquisição de dados foi o TESC, desenvolvido pela mesma empresa citada e acompanha a máquina de ensaio. Para o ensaio de compressão foram considerados aceitáveis os valores que não ultrapassaram os limites de  $\pm 10\%$  da média dos resultados dos três ensaios realizados (E.1, E.2 e E.3).

Como forma de avaliar a perda da plasticidade dos dois tipos de solos por conta da adição do cimento, os corpos de prova, após o rompimento, foram previamente secos, destorroados e repartidos numa quantidade suficiente para determinação dos limites de liquidez e plasticidade, segundo as respectivas normas.

## 3 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1 - Caracterização dos solos estudados

#### 3.1.1 - Solo areno-argiloso

Os resultados dos ensaios de caracterização e mecânicos estão apresentados no Quadro 1 e a curva granulométrica na Figura 1. A granulometria média, segundo a AASHTO, revelou as seguintes porcentagens: 28,37% pedregulho, 49,85% areia, 7,12% silte e 14,66% argila, caracterizando um solo areno-argiloso SC, segundo a Unified Soil Classification System e A-2-6 (0), segundo a Transportation Research Board. As características dos solos do grupo A-2-6 são porcentagens entre 15 e 35% de material passando na #200, porção de finos contendo argila plástica e IG variando de 0 a 4. Para o grupo SC, os solos são caracterizados como arenosos com finos argilosos cuja plasticidade pode ser baixa a alta, refletindo mais no comportamento do solo do que na composição granulométrica (DNIT, 2006).

No ensaio de compactação, os dois ensaios apresentaram baixa variação, menos do que o limite de  $\pm 5\%$ . No entanto, no ensaio de resistência à compressão simples o ensaio 1 ultrapassou o limite de  $\pm 10\%$ , não sendo considerado no valor da média dos resultados. Como esse solo apresenta variações percentuais de cada fração, não há como induzir um resultado para a RCS. Mesmo nos ensaios 2 e 3 estes apresentaram o mesmo valor de resistência; isso aconteceu ao acaso, diferenciando muito do Ensaio 1. Essa diferença de valores pode ser atribuída ao momento da moldagem, onde a fração mais grossa do solo concentra-se numa região do corpo de prova que pode influenciar bastante na resistência do solo.

Quadro 1 - Resultados da caracterização e ensaios mecânicos do solo areno-argiloso

Ensaio	Valores		
Limite de liquidez (%)	34	35	
		34*	
Limite de plasticidade (%)	18	18	
		18*	
Índice de plasticidade (%)		16	
Densidade real dos grãos		2,69	
Massa específica aparente seca máxima ( $\text{kN/m}^3$ )	21,21	20,92	
		21,07*	
Umidade ótima (%)	9,0	8,9	
		8,9*	
Resistência à compressão simples (MPa)	0,72	0,90	0,90
		0,90*	

\* média dos valores obtidos nos respectivos ensaios

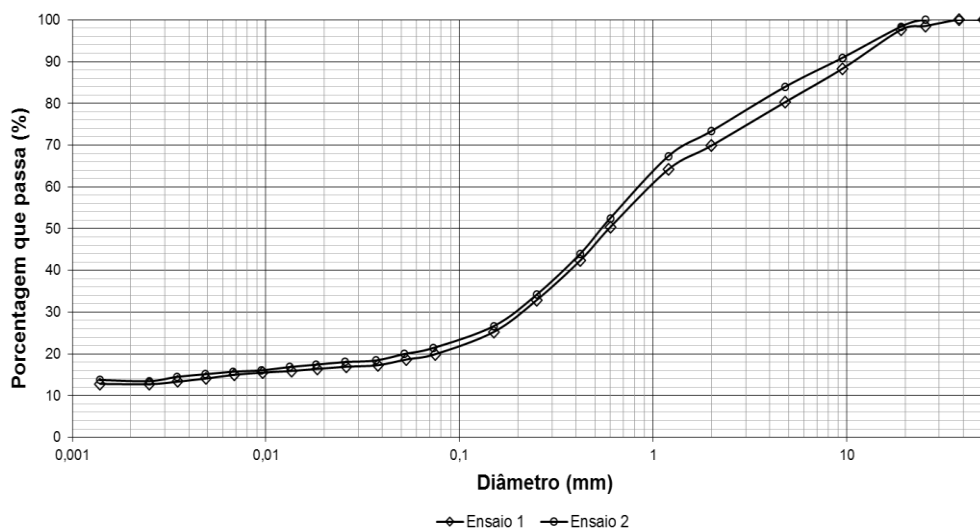


Figura 1 – Curva granulométrica do solo areno-argiloso

### 3.1.2 - Solo argiloso

Os resultados dos ensaios de caracterização e mecânicos estão apresentados no Quadro 2 e a curva granulométrica na Figura 2. A granulometria média, segundo a AASHTO, revelou as seguintes porcentagens: 5,81% pedregulho, 29,36% areia, 22,99% silte e 41,85% argila, caracterizando um solo argiloso CL, segundo a Unified Soil Classification System e A-7-6 (14), segundo a Transportation Research Board. As características dos solos do grupo A-7-6 inclui materiais com elevados índices de plasticidade em relação aos limites de liquidez, estando sujeitos a elevadas mudanças de volume. Para o grupo CL, os solos são caracterizados como argila de baixa plasticidade arenosa, os quais são essencialmente argilas sem matéria orgânica e, em geral, arenosas (DNIT, 2006). Apesar da elevada porcentagem de solo que passa na peneira #200 (0,075 mm), 64,84%, o comportamento em relação a plasticidade sofreu influência da fração fina da areia com porcentagem média de 24,32%.

No ensaio de compactação, os dois ensaios apresentaram baixa variação, menos do que o limite de  $\pm 5\%$ . A resistência à compressão simples apresentou elevados valores, porém esses resultados foram obtidos com corpos de provas sem imersão por quatro horas em água, i.e., os corpos de provas, após moldagem, foram submetidos a cura por sete dias em câmara úmida e, em seguida, foram rompidos. A razão para a não imersão está no fato do corpo de prova se desintegrar ao ser imerso, desconfigurando-se totalmente do formato moldado (cilindro 10 cm x 20 cm) o que inviabilizaria o ensaio de resistência, além de que, neste caso, o solo não está misturado ao cimento Portland. É uma característica desse tipo de solo apresentar elevadas resistências quando seco e baixas quando úmido. Trabalhando com emulsão asfáltica na estabilização de três solos do Estado de Sergipe, Santos (2009) usou um solo A-7-6 (15) da mesma região de coleta usado na presente pesquisa, e segundo o autor, os corpos de prova sem o aditivo se desintegravam ao ser imerso em água pelo período de quatro horas.

Quadro 2 - Resultados da caracterização e compactação do solo argiloso

Ensaio	Valores		
Limite de liquidez (%)	47	45	
	46*		
Limite de plasticidade (%)	21	22	
	21*		
Índice de plasticidade (%)	25		
Densidade real dos grãos	2,67		
Massa específica aparente seca máxima (kN/m <sup>3</sup> )	18,65	18,60	
	18,63*		
Umidade ótima (%)	14,0	15,0	
	14,5*		
Resistência à compressão simples (MPa)	2,17	2,13	2,31
	2,20*		

\* média dos valores obtidos nos respectivos ensaios

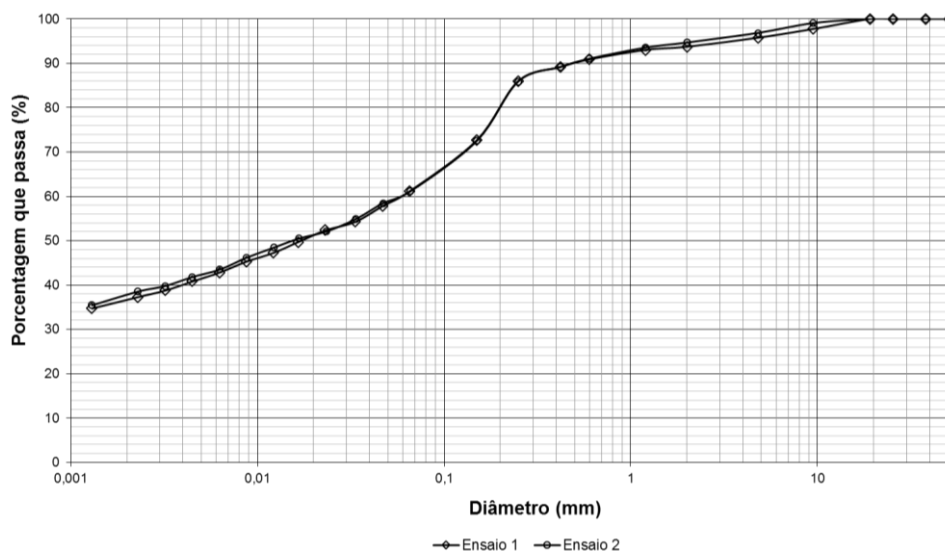


Figura 2 - Curva granulométrica do solo argiloso

### 3.2 - Caracterização das misturas dos solos e cimento Portland

As curvas de compactação com os valores médios obtidos dos dois ensaios estão apresentados na Figura 3 e os resultados da resistência à compressão simples, com sua respectiva umidade de moldagem, estão no Quadro 3, ambos para o solo areno-argiloso.

Dos valores médios de resistência à compressão simples após os sete dias de cura, conforme Figura 4, observa-se que ao aumentar o teor de cimento há um aumento na resistência da mistura, ao passo que a variação do aumento é maior quando o teor do aditivo ultrapassa 5%, atingindo uma resistência igual a 2,84 MPa, quando o teor usado é 9%. Essa resistência é cerca de 35% maior que a resistência mínima de 2,1 MPa especificada na norma DNIT 143/2010 - ES, para utilização em base de pavimento.

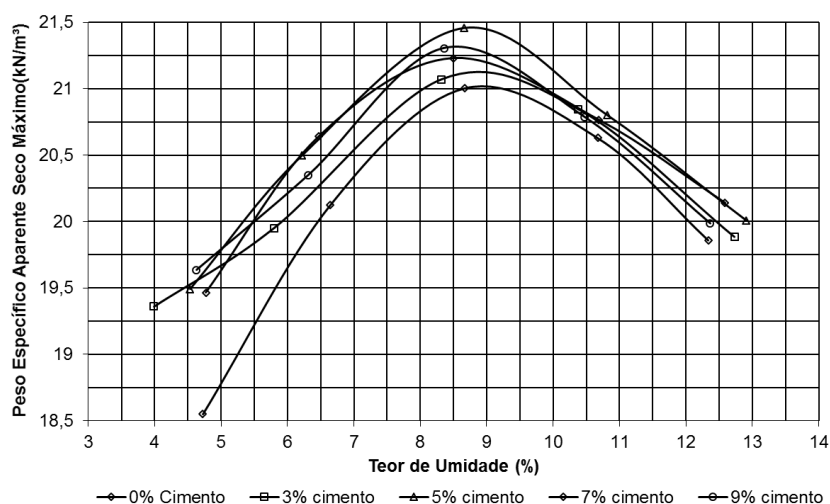


Figura 3 - Curvas de compactação do solo areno-argiloso para cada teor de cimento

Quadro 3 - Resistência à compressão simples do solo areno-argiloso, aos sete dias de cura

Teor de Cimento (%)	Resistência à compressão simples (MPa) / umidade de moldagem (%)		
0	0,72/9,0	0,90/8,2	0,90/8,6
3	1,07/8,5	1,08/8,6	1,00/8,6
5	1,31/8,4	1,19/8,4	1,15/8,5
7	1,78/8,4	1,94/8,4	1,97/8,6
9	2,26/8,3	2,87/8,5	2,81/8,3

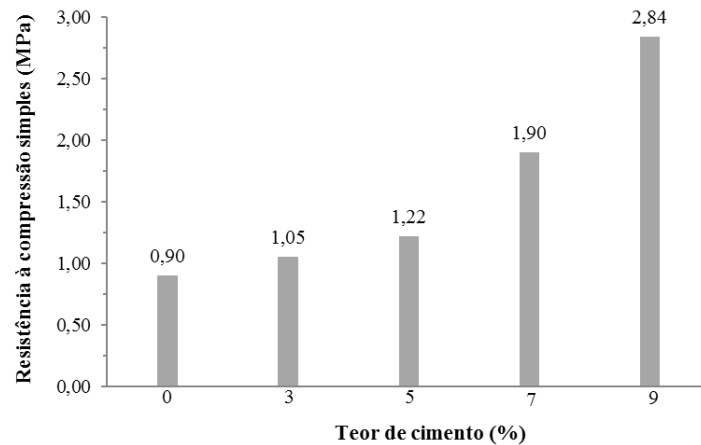


Figura 4 – Resistência à compressão simples (MPa) versus teor de cimento (%) do solo areno-argiloso

As curvas de compactação com os valores médios obtidos dos dois ensaios estão apresentados na Figura 5 e os resultados da resistência à compressão simples, com sua respectiva umidade de moldagem, estão no Quadro 4, ambos para o solo argiloso. Sobre os teores de cimento, a partir do ábaco presente na ABNT 12253/1992 o teor mínimo para esse tipo de solo estaria em torno de 9%. Quanto aos valores obtidos de resistência após os sete dias de cura, observa-se uma incoerência tanto entre o mesmo teor de cimento para diferentes ensaios, quanto para teores crescentes do aditivo.

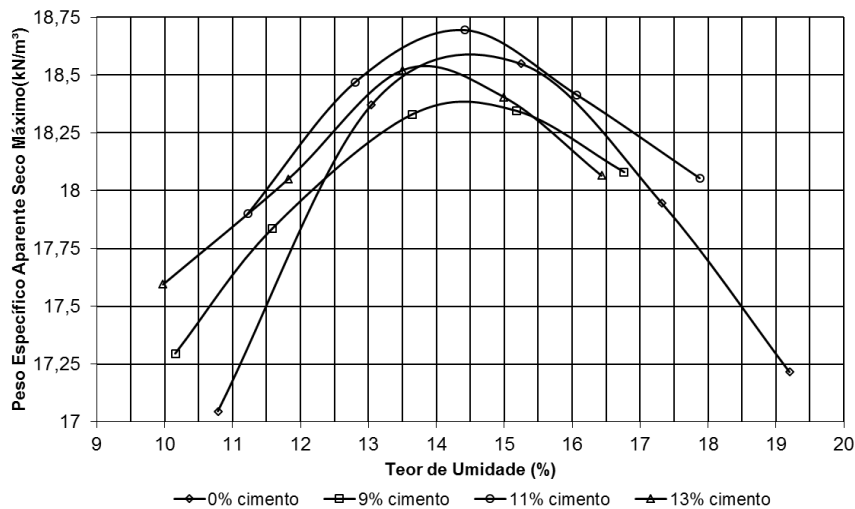


Figura 5 – Curvas de compactação do solo argiloso para cada teor de cimento

Quadro 4 – Resistência à compressão simples do solo argiloso, aos sete dias de cura

Teor de cimento (%)	Resistência à compressão simples (MPa) / umidade de moldagem (%)						
0	2,17/14,6	2,13/14,5	2,31/14,5				
9	5,35/16,9	2,43/15,8	2,13/15,2	*/14,0			
11	5,44/17,2	4,38/17,3	3,02/15,4	*/14,3			
13	2,43/14,3	3,34/14,8	3,29/15,1	4,47/18,2	4,53/16,8	2,10/14,8	*/13,2

\* após imersão por 4 horas o corpo de prova se desintegrou, não sendo possível realizar o ensaio

Cabe destacar que, na execução dos ensaios, os procedimentos realizados seguiram a mesma sequência, ou seja, determinadas as massas do solo e do cimento, ambos foram misturados a seco até completa homogeneização, seguido do acréscimo de água e novamente realizando a mistura da massa úmida para a moldagem. Mesmo calculando o teor de água a partir da umidade ótima, em alguns ensaios a porcentagem de água obtida ficou maior. Isso ocorreu, pois ao se misturar o cimento ao solo com o teor de água ótimo notava-se uma aparência mais seca, optando-se por acrescentar mais água para se aproximar do teor ótimo. No entanto, ao se determinar a umidade da moldagem, a mistura apresentava-se com o teor acima do ótimo. Daí a maior repetição de ensaios para esse solo até que se chegasse ao teor de água mais próximo da umidade ótima. Cabe destacar ainda que os resultados da resistência

apresentaram valores acima de 2,1 MPa, tomado como referência, porém, não houve uma tendência nos valores como observado para o solo areno-argiloso.

Sobre a incoerência dos resultados apresentados no Quadro 4:

- ✓ os dados obtidos para esse solo não corroboram com a teoria, i.e., quanto maior o teor de cimento, a resistência à compressão simples não cresce na proporção do aditivo;
- ✓ para 9% de cimento, a umidade de moldagem diminuiu e, conseqüentemente, a resistência também diminuiu;
- ✓ para 11% de cimento, apesar da redução da umidade, a resistência também reduziu, porém, nos ensaios E.1 e E.2, com a mesma umidade, a resistência do E.1 foi 1,06 MPa maior;
- ✓ para 13% de cimento a inconsistência foi bem evidente, onde não se observa uma relação entre a umidade e a resistência. Ensaios com a mesma umidade apresentaram variação de resistência de 1,24 MPa, respectivamente os ensaios E.2 e E.6. Além deles, o ensaio E.5 com uma umidade intermediária entre os resultados apresentou a maior resistência;
- ✓ para os ensaios com cimento, em que a umidade de moldagem ficou abaixo da ótima, não foi possível realizar o ensaio de compressão, pois o corpo de prova se desintegrou após a imersão em água por 4 horas, como mostra a Figura 6.



Figura 6 - Desintegração do corpo de prova moldado para compressão simples após a imersão em água por 4 horas

A princípio, essa desintegração pode ser atribuída à quantidade de água insuficiente durante a moldagem, i.e., comparando as porcentagens de água da moldagem dos corpos de provas com as porcentagens das umidades ótimas de cada teor de cimento, observa-se que os corpos de prova que se desintegraram ficaram com umidades abaixo e/ou praticamente iguais da ótima. Observação contrária pode ser vista em outros ensaios, em que a umidade de moldagem foi maior e os corpos de provas não se desintegraram. Isso indica a necessidade de haver uma umidade de moldagem acima da umidade ótima para cada um dos teores de cimento. A partir dos resultados obtidos de resistências, essa umidade de moldagem ideal gira em torno de 1,5% acima da umidade ótima, para esse tipo de solo.

Para os dois solos, observa-se uma tendência de diminuir o teor de umidade ótimo com o aumento do teor de cimento e isso pode ser atribuído à diminuição da quantidade de solo em favor do acréscimo de cimento, ou seja, diminuindo a quantidade de solo, diminui também a porcentagem da fração argila que tende a absorver água. Como consequência, acarreta uma redução no teor ótimo.

Em relação ao ganho de resistência, principalmente para aquele apresentado pelo solo areno-argiloso, pode ser explicado segundo um modelo matriz-esqueleto proposto por Herzog (1967) e sumarizado de Rodrigues (1992): numa argila, cuja estrutura é feita de domínios de tamanhos diferentes, existem vazios interconectados numa certa extensão - esses domínios consistem em placas de argila orientada paralelamente em pacotes fechados, comportando-se como unidades estruturais em argilas. A hidratação do cimento e a ocorrência de reações secundárias formam um corpo no qual o centro endurecido de cimento é rodeado por uma zona desses domínios argilosos que se unem por cimentação "interdomínio". Externamente a essa zona formam-se canais pelos macroporos interconectados dentro da massa argilosa que podem ficar revestidos de cimento e se apresentam como ramificações relativamente fortes e reforçadas, estendendo-se do corpo à matriz inalterada.

Rodrigues (1992) ainda descreve que se o conteúdo de cimento for muito baixo, tais unidades de esqueleto se comportam como partículas bem granulares e separadas, flutuando na matriz argilosa. Aumentando-se um pouco a quantidade de cimento, as unidades do esqueleto ficam menos espaçadas, porém não interconectadas. Já com teores maiores, o espaço entre elas é menor e as ramificações tornam-se interligadas, aumentando a resistência e a estabilidade da matriz argilosa. Para quantidades de cimento

ainda maiores não há produção de matriz, sugerindo a formação de um esqueleto rígido, completamente interconectada, tornando-se maior fonte de resistência do sistema.

Os ensaios de limites de Atterberg foram realizados para avaliar a perda de plasticidade com a adição de cimento ao solo. Nesse caso, as amostras da mistura para tais ensaios foram coletadas dos corpos de prova após serem rompidos à compressão. Os resultados estão apresentados na Figura 7 para o solo areno-argiloso e na Figura 8 para o solo argiloso.

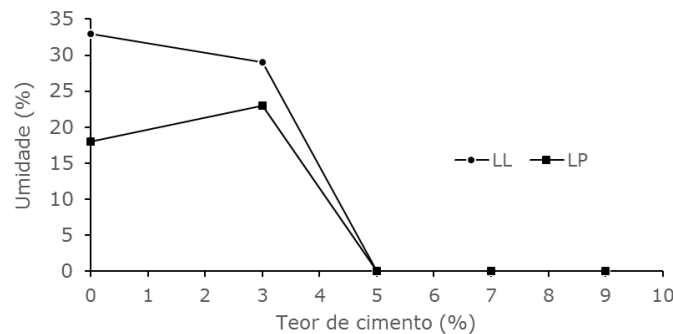


Figura 7 - Limites de Atterberg da mistura do solo areno-argiloso e cimento Portland após rompimento à compressão

Diante dos valores desses limites, nota-se que a adição de 3% de cimento reduziu fortemente a plasticidade, e a partir de 5%, a mistura não apresentou mais essa característica, tornando-se não-plástica, concordando com os conceitos básicos das misturas solo-cimento, em que o cimento Portland reduz a plasticidade do solo, sendo necessário tempo suficiente para ocorrer as reações de hidratação e endurecimento do cimento.

Dos resultados apresentados na Figura 8, observa-se que a adição de 9% de cimento reduziu acentuadamente a plasticidade da mistura, diminuindo 17%. Aumentando o teor do aditivo para 13% a mistura se apresentou como não-plástica.

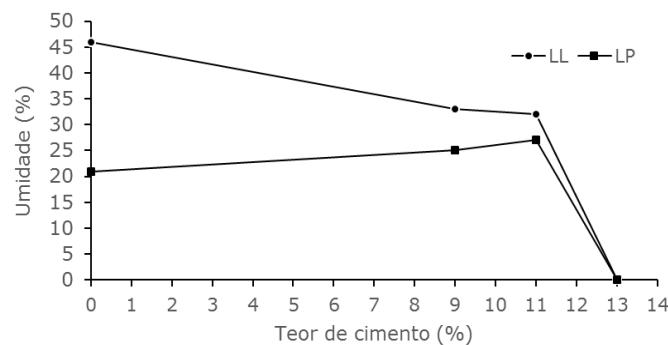


Figura 8 - Limites de Atterberg da mistura do solo argiloso e cimento Portland após rompimento à compressão

É importante observar que não houve diferenças nos valores dos limites em relação ao solo natural e o solo com 0% de cimento após rompimento à compressão aos sete dias de cura. De fato, se para determinar os limites de Atterberg o solo deve passar na peneira nº 40 (#0,42 mm), ou seja, uma amostra de material a partir da fração areia fina, a percepção na alteração da plasticidade seria para solo com uma maior quantidade de material próximo à essa fração, uma vez que a energia de compactação tenderia a quebrar esses grãos, o que aumentaria a fração passante na peneira nº 40. No entanto, a energia aplicada tem forte influência nessa quebra, pois na moldagem dos corpos de prova com energia intermediária não foi suficiente para quebrar os grãos do solo numa quantidade necessária que alterasse a plasticidade.

Comparando-se os limites em relação aos teores de cimento, nota-se que, para o solo areno-argiloso, o limite de liquidez diminui e o de plasticidade aumenta, numa variação de 4 e 5%, respectivamente. O mesmo comportamento pode ser observado para o solo argiloso. No entanto, a variação no limite de liquidez foi bem mais significativa (13%) quando comparado à plasticidade (4%) para o teor de 9% de cimento. Cabe salientar que as reações de troca catiônica foram mais atuantes no solo argiloso (A-7-6), uma vez que a porcentagem da fração argila foi maior.

A partir dos resultados de resistência e dos limites de Atterberg observa-se a ação modificadora do cimento, à medida em que promove a diminuição da plasticidade do solo, mas com pouco ganho de resistência, enquanto que a ação aglutinadora, permitiu um aumento de resistência. Porém, essas observações foram mais nítidas no solo com característica areno-argilosa, uma vez que o aditivo usado nessa pesquisa é mais indicado para esse tipo de solo. Para o solo de característica argilosa, o cimento contribui bem mais na



redução da plasticidade, ainda que, em relação à resistência, não foi possível determinar um teor ideal entre aqueles ensaiados. Para este solo, uma alternativa mais barata seria a utilização da cal, pois o teor de 9% do aditivo pode tornar a mistura antieconômica.

#### 4 - CONCLUSÃO

Os resultados e as análises realizadas neste trabalho permitem concluir que ao se adicionar o cimento Portland aos diferentes solos, há uma tendência de diminuição no teor de umidade ótimo, onde no caso do solo areno-argiloso a resistência à compressão simples aumenta, porém, não é diretamente proporcional para todos os teores, verificando-se que o crescimento é mais acentuado para teores acima de 5% de cimento. Observa-se uma redução na plasticidade a partir de 3% do aditivo. Já para o solo argiloso observa-se uma variabilidade nos valores da resistência à compressão, e, por isso, não foi possível determinar um teor ideal de cimento. A umidade de moldagem pode influenciar nesses valores, uma vez que alguns corpos de prova se desintegraram após a imersão em água para umidades abaixo da umidade ótima. No entanto, a resistência obtida ainda ficou acima de 2,1 MPa, valor adotado como referência para o fim que se propõe a pesquisa. Observa-se uma redução significativa na plasticidade do solo para a inserção de 9% de cimento. Pode-se observar também as alterações devido à ação modificadora do cimento, para os teores mais baixos do aditivo, e a ação aglutinadora, para os teores mais altos, principalmente no solo areno-argilosos.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio à pesquisa de doutoramento do primeiro autor e ao laboratório GeoPav da UFS pelo apoio físico e técnico para realização das pesquisas.

#### REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12253 (1992). Solo-cimento – dosagem para emprego como camada de pavimento. Rio de Janeiro.

Ceratti, J.A.P. (1991). *Estudo do comportamento a fadiga de solos estabilizados com cimento para utilização em pavimento*. Rio de Janeiro: UFRJ (Tese de Doutorado).

Concha, L.M.C. (1986). *Estudo da fadiga de duas misturas de solo-cimento*. Rio de Janeiro: UFRJ (Dissertação de Mestrado).

Cruz, M.L.S. (2004). *Novas tecnologias da aplicação de solo-cimento*. Braga: Universidade do Minho (Dissertação de Mestrado).

Cruz, M.L.S.; Jalali, S. (2010). Melhoramento do desempenho de misturas de solo-cimento. *Revista Luso-Brasileira de Geotecnia*, Portugal, n. 120, p. 49-64.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADA DE RODAGEM – ME 041 (1994). Solos – preparação de amostras para ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_ – ME 093 (1994). Solos – determinação da densidade real. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_ – ME 051 (1994). Solos – análise granulométrica. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_ – ME 082 (1994). Solos – determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_ – ME 122 (1994). Solos – determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_ – ME 129 (1994). Solos – compactação utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_ – ME 202 (1994). Solo-cimento – moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_ – ME 201 (1994). Solo-cimento – compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_ – ME 216 (1994). Solo-cimento – determinação da relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente. Rio de Janeiro.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE (2006). *Manual de Pavimentação*. Publicação IPR – 719. 3ª ed. Rio de Janeiro, 274p.

\_\_\_\_\_. DNIT 139/2010 – ES – Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente – Especificação de Serviço, Rio de Janeiro: IPR.

- \_\_\_\_\_. DNIT 143/2010 – ES – Pavimentação – Base de solo-cimento – Especificação de Serviço, Rio de Janeiro: IPR.
- Herzog, A. (1967). Evidence for a skeleton-matrix structure in clays stabilized with Portland cement. *5th Australia-New Zealand Conference on SMFE*.
- Jung, J.G., Stracke F., Korf, E.P., Consoli, N.C. (2012). A influência do tipo de cimento na resistência à compressão simples de uma areia artificialmente cimentada. *Revista Luso-Brasileira de Geotecnia*, Portugal, n. 125, p. 87-94.
- Little, D.N. (1995). *Handbook for stabilization of pavement subgrades and base courses with lime*. 219 p. Disponível em: <[http://www.limetexas.org/publications/txt\\_567414o.pdf](http://www.limetexas.org/publications/txt_567414o.pdf)>. Acesso em 4 abr. 2014.
- Marangon, M. (1992). *Utilização de solo-cimento em uma solução alternativa de estrutura de arrimo*. Rio de Janeiro: PUC. (Dissertação de Mestrado).
- Pereira, O.A. (1970). *Estabilização de solos*. Curso de especialização 108, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Rodrigues, M.G.M. (1992). *Contribuição ao estudo do método físico-químico de dosagem do solo-cimento*. Rio de Janeiro: UFRJ. (Dissertação de Mestrado).
- Santos, W.J. (2009). *Avaliação do uso de emulsão asfáltica na estabilização química de três solos de Sergipe*. Campina Grande: UFCG. (Dissertação de Mestrado).
- Vargas, M. (1977). *Introdução à mecânica dos solos*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, Ed. da Universidade de São Paulo. 509 p.